

Теплотехника

Термодинамика открытых систем

Уравнение первого закона ТД для потока

Под **открытыми** понимаются термодинамические системы, которые кроме обмена теплотой и работой с окружающей средой допускают также и обмен массой.

В технике широко используются процессы преобразования энергии в потоке, когда рабочее тело перемещается из области с одними параметрами (p_1, v_1) в область с другими (p_2, v_2). Это, например, расширение пара в турбинах, сжатие газов в компрессорах.

Уравнение первого закона ТД для потока

Будем рассматривать лишь одномерные стационарные потоки, в которых параметры зависят только от одной координаты, совпадающей с направлением вектора скорости, и не зависят от времени.

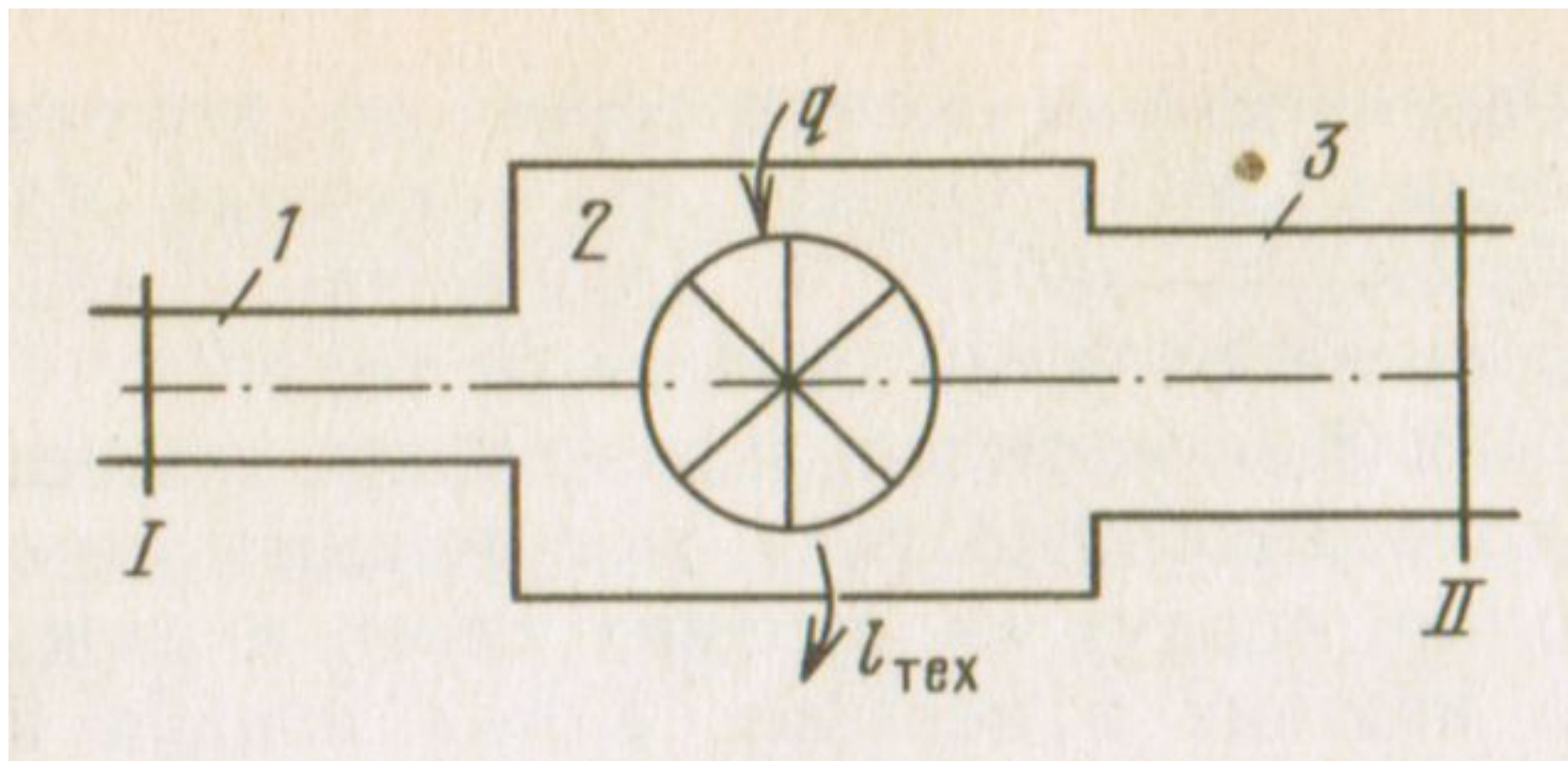
Условие неразрывности течения в таких потоках заключается в одинаковости массового расхода m рабочего тела в любом сечении:

$$m = Fc/v = \text{const}, \quad (1)$$

где F — площадь поперечного сечения канала;
 c — скорость рабочего тела.

Уравнение первого закона ТД для потока

Схема открытой термодинамической системы



Уравнение первого закона ТД для потока

По трубопроводу 1 рабочее тело с параметрами T_1 , p_1 , v_1 подается со скоростью c_1 в тепломеханический агрегат 2 (двигатель, паровой котел, компрессор и т. д.). Здесь каждый килограмм рабочего тела может получать от внешнего источника теплоту q и совершать техническую работу $i_{тех}$, например, приводя в движение ротор турбины, а затем удаляется через выхлопной патрубок 3 со скоростью c_2 , имея параметры T_2 , p_2 , v_2 .

Примечание. ***Технической*** называется работа, отбираемая из потока за счет каких-либо технических устройств или подводимая к нему.

Уравнение первого закона ТД для потока

Первый закон термодинамики в обычной записи:

$$q = \Delta u + l$$

Внутренняя энергия есть функция состояния рабочего тела, поэтому значение u_1 определяется параметрами рабочего тела при входе (сечение потока I), а значение u_2 - параметрами рабочего тела при выходе из агрегата (сечение II)

Уравнение первого закона ТД для потока

Работа расширения / совершается рабочим телом на поверхностях, ограничивающих выделенный движущийся объем (на стенках агрегата) и границах, выделяющих этот объем в потоке.

Часть стенок агрегата неподвижна, и работа расширения на них равна нулю. Другая часть стенок специально делается подвижной (рабочие лопатки в турбине и компрессоре, поршень в поршневой машине), и рабочее тело совершает на них техническую работу $l_{тех}$.

Уравнение первого закона ТД для потока

При входе рабочее тело вталкивается в агрегат. Для этого нужно преодолеть давление p_1 .

Поскольку $p_1 = \text{const}$, то каждый килограмм рабочего тела может занять объем v_1 лишь при затрате работы, равной $l_{em} = -p_1 v_1$

Уравнение первого закона ТД для потока

Для того чтобы выйти из трубопровода 3, рабочее тело должно вытолкнуть из него такое же количество рабочего тела, ранее находившегося в нем, преодолев давление p_2 , т. е. каждый килограмм, занимая объем V_2 , должен произвести определенную работу выталкивания:

$$l_{\text{выт}} = p_2 V_2$$

Сумма $l_{\text{в}} = p_2 V_2 - p_1 V_1$, называется **работой вытеснения**.

Уравнение первого закона ТД для потока

Если скорость c_2 на выходе больше, чем c_1 на входе, то часть работы расширения будет затрачена на увеличение кинетической энергии рабочего тела в потоке, равное

$$c_2^2 / 2 - c_1^2 / 2$$

Уравнение первого закона ТД для потока

В неравновесном процессе некоторая работа l_{mp} может быть затрачена на преодоление сил трения. Окончательно получим:

$$l = l_{mex} + (p_2 v_2 - p_1 v_1) + (c_2^2 / 2 - c_1^2 / 2) + l_{mp} \quad (2)$$

Уравнение первого закона ТД для потока

Теплота, сообщенная каждому килограмму рабочего тела во время прохождения его через агрегат, складывается из теплоты $q_{внеш}$, подведенной снаружи, и теплоты $q_{тр}$, в которую переходит работа трения внутри агрегата, т. е.

$$q = q_{внеш} + q_{тр}$$

Уравнение первого закона ТД для потока

Подставив полученные значения q и l в уравнение первого закона термодинамики, получим

$$\begin{aligned} q_{\text{внеш}} + q_{\text{тр}} &= \\ &= u_2 - u_1 + l_{\text{тех}} + p_2 v_2 - p_1 v_1 + c_2^2 / 2 - c_1^2 / 2 + l_{\text{тр}} \end{aligned}$$

Уравнение первого закона ТД для потока

Поскольку теплота трения равна работе трения ($q_{тр} = l_{тр}$), а $u + pv = h$, окончательно получим **уравнение первого закона термодинамики для потока**

$$q_{внеш} = h_2 - h_1 + l_{тех} + (c_2^2 - c_1^2) / 2 \quad (3)$$

Уравнение первого закона ТД для потока

Формулировка первого закона термодинамики для потока:

Теплота, подведенная к потоку рабочего тела извне, расходуется на увеличение энтальпии рабочего тела, производство технической работы и увеличение кинетической энергии потока.

Уравнение первого закона ТД для потока

В дифференциальной форме уравнение (3) записывается в виде

$$\delta q_{\text{внеш}} = dh + \delta l_{\text{тех}} + d(c^2 / 2) \quad (4)$$

Это уравнение справедливо как для равновесных процессов, так и для течений, сопровождающихся трением.

Уравнение первого закона ТД для потока

Применение первого закона термодинамики к различным типам тепломеханического оборудования.

Теплообменный аппарат (устройство, в котором теплота от жидкой или газообразной среды передается другой среде).

В этом случае $l_{\text{тех}}=0$, а $(c_2^2 - c_1^2) \ll q_{\text{внеш}}$

Тогда

$$q_{\text{внеш}} = h_2 - h_1 \quad (5)$$

Для теплообменника, установленного в потоке, это выражение справедливо не только в изобарном процессе, но и в процессе с трением, когда давление среды уменьшается из-за сопротивления.

Уравнение первого закона ТД для потока

Тепловой двигатель.

$$(c_2^2 - c_1^2) \ll l_{\text{тех}}, q_{\text{внеш}} = 0 \Rightarrow l_{\text{тех}} = h_1 - h_2$$

Т.е. рабочее тело производит техническую работу за счет уменьшения энтальпии

Величину $h_1 - h_2$ называют **располагаемым теплоперепадом.**

Уравнение первого закона ТД для потока

Компрессор.

Если процесс сжатия газа в компрессоре происходит без теплообмена с окружающей средой ($q_{внеш} = 0$) и $c_1 = c_2$ (это можно обеспечить соответствующим выбором сечений всасывающего и нагнетательного воздухопроводов), то

$$l_{mex} = h_1 - h_2 \quad (9)$$

В отличие от теплового двигателя здесь $h_1 < h_2$, т. е. техническая работа в адиабатном компрессоре затрачивается на увеличение энтальпии газа.

Уравнение первого закона ТД для потока

Сопла и диффузоры.

Специально спроектированные каналы для разгона рабочей среды и придания потоку определенного направления называются соплами.

Каналы, предназначенные для торможения потока и повышения давления, называются диффузорами. Техническая работа в них не совершается, поэтому уравнение (4) примет вид:

$$\delta q_{\text{внеш}} = dh + d(c^2 / 2)$$

ИСТЕЧЕНИЕ ИЗ СУЖИВАЮЩЕГОСЯ СОПЛА

Рассмотрим процесс равновесного (без трения) адиабатного истечения газа через сопло из резервуара, в котором газ имеет параметры p_1 , v_1 , T_1 .

Скорость газа на входе в сопло обозначим через c_1 . Будем считать, что давление газа на выходе из сопла p_2 равно давлению среды, в которую вытекает газ.

Расчет сопла сводится к определению скорости и расхода газа на выходе из него, нахождению площади поперечного сечения и выбору его формы.

ИСТЕЧЕНИЕ ИЗ СУЖИВАЮЩЕГОСЯ СОПЛА

Скорость истечения

$$(c_2^2 - c_1^2) / 2 = h_1 - h_2 \Rightarrow c_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2) + c_1^2}$$

Пусть площадь входного сечения сопла достаточно большая. Тогда $c_1=0$:

$$c_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)} = \sqrt{2\Delta h_0}$$

ИСТЕЧЕНИЕ ИЗ СУЖИВАЮЩЕГОСЯ СОПЛА

Для идеального газа в адиабатном процессе:

$$c_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

ИСТЕЧЕНИЕ ИЗ СУЖИВАЮЩЕГОСЯ СОПЛА

Массовый расход газа:

$$m = F \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_1}{v_1} \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}$$

Дросселирование газов и паров

Если на пути движения газа или пара в канале встречается препятствие (местное сопротивление), то давление за препятствием будет меньше, чем перед ним. Этот процесс уменьшения давления называется **дросселированием**. При этом не изменяется кинетическая энергия и не совершается работа.

Дросселирование газов и паров

Температура идеального газа при дросселировании остается постоянной. При дросселировании реального газа температура меняется (эффект Джоуля-Томпсона). При чем для одного и того же вещества при различных условиях температура может увеличиваться или уменьшаться.

Дросселирование газов и паров

Состояние газа, в котором $\left(\frac{dT}{dp}\right)_h = 0$

называется **точкой инверсии эффекта Джоуля-Томпсона**. Температура, при которой эффект меняет знак, называется **температурой инверсии**